

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ШЛИФОВАННОЙ АСФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

© 2014 г. М. А. Абдулкадыров, канд. техн. наук; В. Е. Патрикеев; А. П. Семенов, канд. техн. наук

Лыткаринский завод оптического стекла, г. Лыткарино, Московская обл.

E-mail: lastro@lzos.ru

Описаны метод определения абсолютного профиля шлифованной асферической поверхности крупногабаритных астрономических зеркал с использованием линейного трёхточечного сферометра, последовательного перемещаемого перпендикулярно направлению от центра до края детали, а также способ определения вершинного радиуса. Приведены примеры успешного их использования.

Ключевые слова: телескопы, астрономические зеркала, контроль асферической шлифованной поверхности зеркала, линейный сферометр.

Коды OCIS: 220.0220; 220.0230; 220.4610; 350.1260

Поступила в редакцию 25.09.2014

Введение

При шлифовании рабочей поверхности и асферизации шлифованием крупногабаритных астрономических зеркал используются как классические методы обработки, так и асферизация малым инструментом на станках с компьютерным управлением. Для создания управляющей программы обработки необходима информация о форме поверхности, т.е. её топографическая карта. Её можно получить с помощью измерительной машины, позволяющей непосредственно определять форму рабочей поверхности в трёхмерном измерении, сравнивать эту форму с требуемой и находить отклонения, т.е. строить карту отклонений от требуемой формы. Например, для определения формы поверхности деталей диаметром до 1400 мм в ОАО ЛЗОС используется 6-координатная измерительная машина КИМ-1400 российского производства (Саратов), дающая точность отклонений от требуемой асферической поверхности в 2–3 мкм. Она построена по принципу гексапода с измерительной головкой [1]. Использование такой машины для измерений и построения карты поверхности весьма эффективно при шлифовании и особенно асферизации внеосевых оптических деталей, что позволяет получать отклонения от требуемой формы поверхности менее 5–8 мкм.

Известны способы определения отклонений от сферической формы оптической поверхности с использованием механических приборов [2–4]. В профилометре (*the swing arm profilometer*) измерительную головку, закреплённую на поворотной наклонной штанге, последовательно перемещают механически по большим дугам по контролируемой поверхности и с помощью самописца снимают показания индикатора измерительной головки (рис. 1). Профи-

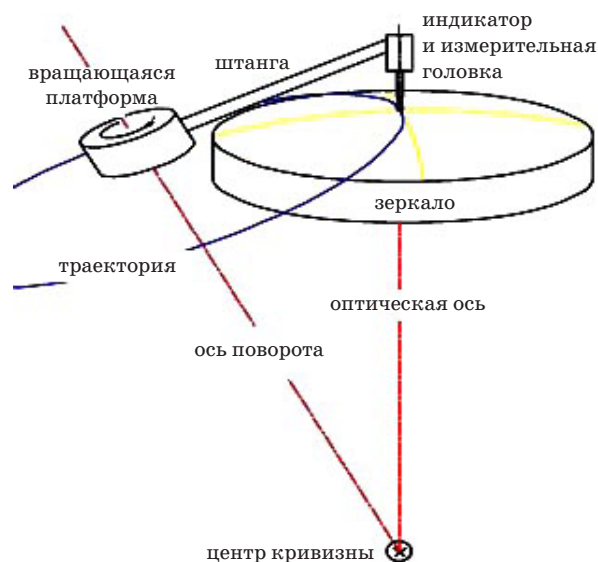


Рис. 1. Профилометр для измерения профиля асферической поверхности.

лометр с поворачивающейся “рукой” измеряет отклонения вдоль дуги по поверхности детали с центром окружности, расположенным на оси, проходящей через центр кривизны ближайшей сферы контролируемой поверхности. Измерения выполняются по нормали к поверхности, и, тем самым, определяются отклонения асферической поверхности от сферы по дугам, проходящим через вершину асферической поверхности. Однако из соображений жёсткости штанги и необходимой точности измерений способ применим для контроля зеркал относительно небольшого диаметра (не более 1 м).

Для определения формы оптической поверхности деталей любых размеров, выпуклых и вогнутых, но осесимметричных, применим метод трёхточечного линейного сферометра [1]. В его основе использовано свойство асферических поверхностей – изменение радиуса в различных зонах поверхности. При установке линейного сферометра на асферическую поверхность между краевыми и центральной ножками измеряется стрелка прогиба, которая изменяется при перемещении сферометра.

Для деталей произвольной формы на стадии шлифования может быть использован инфракрасный (ИК) интерферометр в сочетании с зеркальным корректором волнового фронта [1]. Зеркальный корректор ИК диапазона (длина волны 10,6 мкм), например, использовался для автоматизированной асферизации главных зеркал проектов VST (VLT Survey Telescope) [5] и VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) [6, 7].

Также для измерения отклонений поверхностей деталей любой формы диаметром до 500 мм разработан специальный прибор бесконтактного измерения NANOMEFOS (Nanometer Accuracy Non-contact Measurement of Free-form Optical Surfaces) [8].

Процесс обработки оптических деталей является эффективным, когда используются оптимальные из перечисленных методов в каждом конкретном случае.

Задача поиска эффективного способа получения профиля высокоасферической поверхности, когда ИК интерферометр ещё не представляется возможным использовать, а требуется получить как можно более подробную информацию о профиле для использования в программно-управляемой обработке, привела к необходимости модифицировать способ из-

мерения сферометром профиля крупногабаритных оптических деталей диаметром как до 1 м, так деталей диаметром до 6 м.

Теория метода

Для измерения профиля высокоточных асферических поверхностей крупногабаритных оптических деталей, в частности, зеркал телескопов, используется линейный трёхточечный сферометр с двумя агатовыми ножками на концах и индикаторной головкой (цена деления 0,1 мкм), установленной посередине, база сферометра равна “ a ” – расстоянию между двумя крайними агатовыми ножками сферометра. С помощью такого сферометра измеряют стрелки прогиба вдоль диаметрального направления или по хорде, касательной к центральному отверстию на детали (для деталей с центральным отверстием). Сферометр последовательно смещается на расстояние $a/2$ таким образом, чтобы одна крайняя ножка сферометра перемещалась в положение центральной ножки, центральная в положение второй крайней ножки, а вторая крайняя ножка – в новое положение. Таким образом проходит весь диаметральный отрезок или хорда с шагом в половину базы сферометра. При этом радиус детали (диаметр, хорда) разбивается на отдельные промежутки “ a ”, укладываемые на полном радиусе детали. Результаты сравниваются с расчётными значениями стрелок прогиба при каждом положении сферометра и по данным измерений строится относительный профиль отклонений от ближайшей асферической поверхности для выполнения последующего шлифования.

Дискретность построенного профиля составляет половину базы сферометра, уменьшение его базы приводит к увеличению погрешности определения профиля. Для более точного построения профиля поверхности можно использовать сферометр с двумя, тремя и более индикаторными головками [9] (рис. 2). Точность

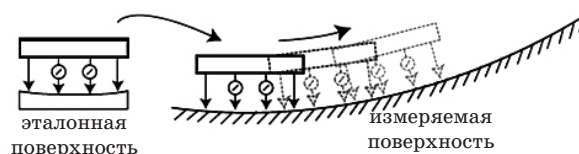


Рис. 2. Сферометр для контроля профиля асферической поверхности.

измерений сферометра может достигать 0,2 мкм при базе сферометра до 1 м с определением профиля в 5–10 мкм (среднеквадратическое отклонение) и измерением радиуса кривизны крупногабаритного зеркала с точностью 10 мм при радиусе 30 м.

Практическое использование данного метода в реальных измерениях показало, что с увеличением базы сферометра существенно возрастают его собственные деформации вследствие изменения его наклона к горизонтальному положению при перемещении вдоль диаметрального направления, что приводит к существенным погрешностям в измерениях и, соответственно, к существенным ошибкам в построении профиля.

В предлагаемом способе определения профиля шлифованной асферической поверхности также используется линейный трёхточечный сферометр с базой “ a ” и индикатором посередине. Сферометр помещается в заранее рассчитанные точки. Обычно для устойчивости сферометра на вогнутой или выпуклой поверхности его снабжают хотя бы одной вспомогательной боковой регулируемой ножкой-упором. Эта боковая ножка позволяет регулировать наклон сферометра и устанавливать его по нормали к контролируемой поверхности. Сферометр обнуляется на эталонной поверхности с известным радиусом кривизны, близким к интервалу радиусов асферической поверхности. Затем крайними ножками его устанавливают перпендикулярно диаметральному сечению в крайнюю зону детали с радиусом R_i (рис. 3) и перемещают крайними ножками в зону с радиусом

$$R_{i+1} = \sqrt{R_i^2 - (a/2)^2},$$

в которой до этого располагалась центральная ножка с индикатором. Затем на основании геометрических соотношений строится абсолютный профиль отклонений формы поверхности от заданного (теоретического) профиля с требуемым вершинным радиусом и эксцентриситетом и необходимым допуском на них.

При таком методе измерений существенно увеличивается количество измеренных точек, т.е. мы получаем более подробную информацию о профиле поверхности, чем при продольных измерениях, что важно для анализа профиля поверхности и выполнения асферизации.

Сферометр с базой “ a ” ($A_1 - B_1$ на рис. 3), расстоянием “ b ” от центральной до 4-й боковой ножки, обеспечивающей нормальное к поверхности положение сферометра, (рис. 4)

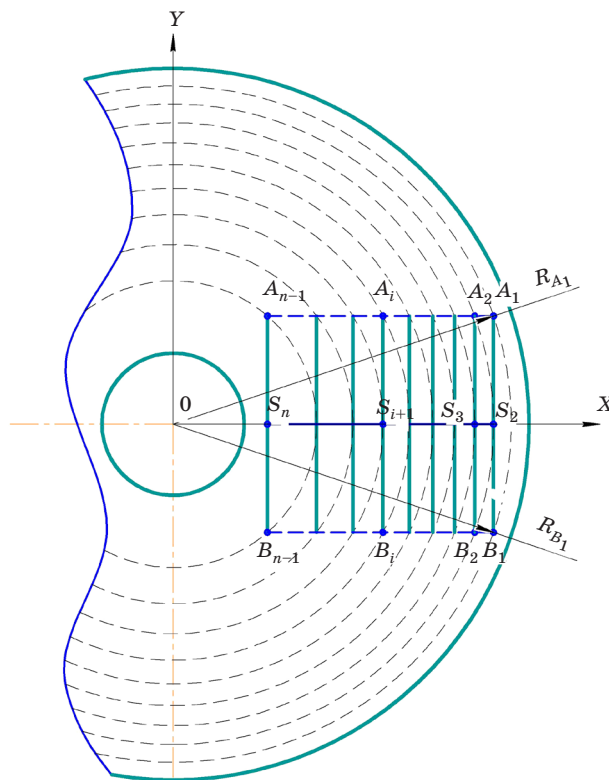


Рис. 3. Схема установки ножек сферометра на поверхности и схема для расчёта установочных точек.

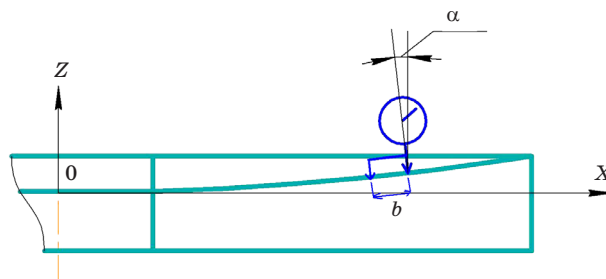


Рис. 4. Схема расположения индикатора.

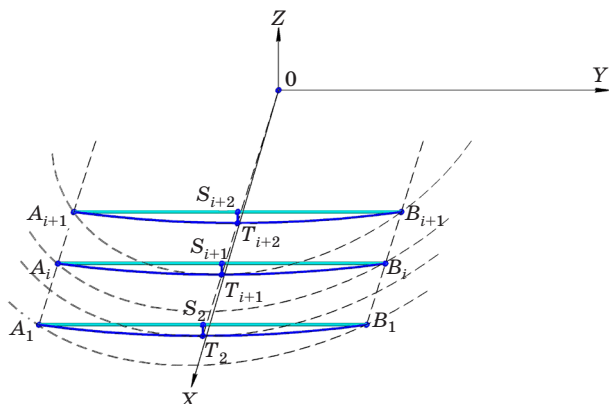


Рис. 5. Схема опорных точек и отрезков.

помещается на эталонную поверхность, обнуляется, устанавливается крайними ножками на контролируемую деталь перпендикулярно диаметральному сечению и по нормали к поверхности (рис. 4) в первую краевую зону детали (в точки A_1, B_1 рис. 3, 5) с радиусом R_{A_1} в плоскости XY , в которой отклонение профиля принимается равным $P_1 = 0$. Показания сферометра снимаются ($\Delta s_{1, \text{real}}$) относительно эталонной поверхности в точке T_2 в зоне с расстоянием от центра $R_{a_2} = \sqrt{R_{A_1}^2 - (a/2)^2}$, в которой теоретическое значение должно быть $\Delta s_{2, \text{id}}$. Определяется добавка к профилю $\Delta p_2 = \Delta s_{2, \text{real}} - \Delta s_{2, \text{id}}$ и отклонение профиля в точке $P_2 = P_1 + \Delta p_2$. Далее сферометр перемещают крайними ножками в зону, в которой располагалась центральная ножка. Снова выполняются измерения стрелки прогиба и определяются отклонения профиля в точке $P_{i+1} = P_i + \Delta p_i$. Процесс измерений продолжают до центра детали или до центрального отверстия $P_n = P_{n-1} + \Delta p_{n-1}$. Затем строится абсолютный профиль с учётом отклонений от формы поверхности с требуемыми вершинным радиусом и эксцентриситетом.

$\Delta s_{i, \text{id}}$ определяется из уравнения асферической поверхности, которое в общем виде записывается следующим образом:

$$z = \frac{cS^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2S^2}} + A_1S^4 + A_2S^6 + A_3S^8 + A_4S^{10},$$

где $S^2 = x^2 + y^2$, $c = 1/R_0$ – величина, обратная вершинному радиусу, $K = -e^2$, а e – эксцентриситет поверхности, A_1, A_2, A_3, A_4 – коэффициенты асферики поверхностей более высокого порядка (выше 2-го).

Определим значения $z_{A_1}, z_{A_2}, z_{T_2}$ и стрелку прогиба за вычетом стрелки прогиба эталонной поверхности arrow_{sh}

$$\Delta s_{i, \text{id}} = (z_{A_1} - z_{T_2} - \text{arrow}_{\text{sh}}) \cos \alpha,$$

где угол α – угол между вертикалью и нормалью к поверхности в измеряемой точке.

Практические результаты

Реализация метода представлена на примере асферизации шлифованием и измерений сферометром главного зеркала диаметром 3700 мм *Devasthal Optical Telescope (DOT) for Aryabhatta Research Institute of Observational Sciences*

(ARIES) [10] со световым измеряемым диаметром 3670 мм, вершинным радиусом кривизны асферической поверхности 14639,0 мм, конической константой $K = 1,03296$, диаметром отверстия 720 мм. Для измерений использовался линейный трёхточечный сферометр с индикаторной головкой посередине и ценой деления 0,1 мкм, базой $a = 622$ мм и боковой регулируемой по высоте вспомогательной ножкой, закреплённой сбоку индикатора на расстоянии 62 мм. Для обнуления индикатора было изготовлено контрольное эталонное зеркало радиусом 14727,0 мм с учётом, что радиус ближайшей к асферике сферы 14700,2 мм. Асферичность профиля составляет 106 мкм.

Как уже отмечалось, при измерении сферометром вдоль диаметального направления или вдоль хорды с увеличением базы сферометра существенно возрастают его собственные деформации вследствие изменения его наклона к горизонтальному положению, что приводит к существенным погрешностям в измерениях и, следовательно, к существенным ошибкам в построении профиля. В этом методе трудно учесть такие погрешности наклона в двух плоскостях. В описываемом методе при измерениях сферометр устанавливается перпендикулярно радиальному направлению и имеет наклон только в одной плоскости. Изменения показаний сферометра в зависимости от деформаций при наклоне определялись экспериментально, и в расчёт вводилась поправка. Например, в описываемом случае поправка при наклоне сферометра к вертикальному положению на 10° составляет 5 мкм.

В таблице и на рис. 6 приведены результаты расчёта профиля по описанной методике.

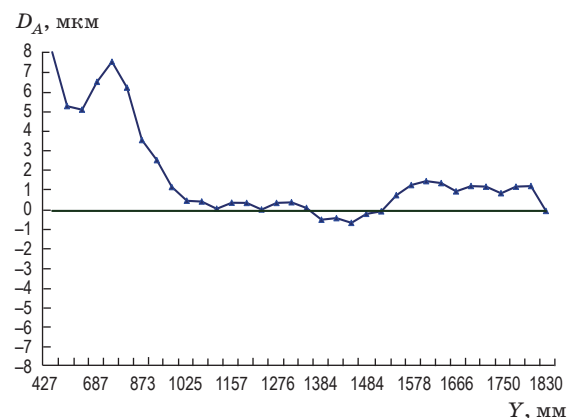


Рис. 6. Результаты расчёта профиля асферической поверхности.

Результаты расчета профиля зеркала диаметром 3670 мм

№ точки	1	2	3	4	5	...	33	34
Y_3 , мм	–	1742,23	1715,60	1688,55	1661,07	...	466,37	365,22
Z_3 , мм	–	103,66	100,52	97,37	94,23	...	7,43	4,56
S_{id} , мкм	–	6,24	5,49	4,75	4,01	...	–17,14	–17,91
S_{real} , мкм	–	4,00	2,00	1,00	1,00	...	–18,00	–16,00
Y , мм	1830,0	1803,78	1777,16	1750,13	1722,66	...	528,33	427,20
Z_{id} , мм	114,3681	111,1147	107,8599	104,6037	101,3460	...	9,533	6,233
Z_{real} , мм	114,3681	111,1160	107,8612	104,6046	101,3472	...	9,539	6,241
A_{id} , мкм	–106,17	–93,97	–82,52	–71,80	–61,83	...	–87,36	–99,30
A_{real} , мкм	–106,17	–92,70	–81,28	–70,90	–60,59	...	–82,00	–91,20
D_A , мкм	0,00	1,27	1,24	0,90	1,24	...	5,35	8,11
α , град	–	7,02	6,92	6,81	6,71	...	2,08	1,69
δ_α	–	3,51	3,46	3,41	3,35	...	1,04	0,84

Примечание. Y_3 , Z_3 – координаты третьей, вспомогательной, ножки на поверхности детали (начало координат в точке вершины детали, координата Y перпендикулярна оптической оси Z). S_{id} и S_{real} – теоретические и фактически измеренные отклонения стрелки прогиба от эталонной сферической поверхности, Y – расстояние от центра детали, Z_{id} и Z_{real} – теоретическое и фактическое значения координаты Z . A_{id} и A_{real} – теоретическое и полученное фактическое значения асферичности относительно ближайшей сферы. D_A – искомые нормальные отклонения асферической поверхности от теоретической. δ_α – поправка в показаниях сферометра.

В последней строке таблицы δ_α – поправка в показаниях сферометра, учитывающая деформации сферометра при наклонном его положении относительно рабочей поверхности. Данная поправка определяется экспериментально при различных углах наклона сферометра α (рис. 4) относительно вертикального положения. Учёт данной деформационной поправки значительно повышает точность измерений.

Для снижения погрешности измерений последние выполняются относительно эталонной сферической поверхности с известным радиусом кривизны, они повторяются несколько раз в каждом положении и усредняются. Измерения выполняются в нескольких диаметральных сечениях на поверхности детали, используется набор сферометров с разной базой, во всех измерениях учитывается поправка на деформации сферометра при наклонном расположении на поверхности измеряемой детали. Без учёта данной погрешности ошибка в описываемом случае может достигать 50 мкм (!)

Суммарная погрешность определения профиля выражается суммой погрешностей каждого измерения. Если каждое измерение выполнено с точностью 1 мкм, то в рассматриваемом случае (18 стоянок) суммарная максимальная и наи-

менее вероятная погрешность будет составлять 18 мкм, если погрешность измерений 0,2 мкм, то суммарная погрешность определения профиля менее 4 мкм.

На рис. 6 приведён усреднённый профиль, отклонения составляют около 6 мкм. Отклонения фактические включают астигматизм, асимметрию и другие остаточные ошибки. Поэтому после предварительной полировки поверхности был выполнен интерферометрический контроль с CGH-корректором и получены подтверждающие результаты.

Фактические измерения вершинного радиуса поверхности показали значение $R_0 = 14639 \pm 5$ мм (требуемое значение ± 7 мм), что составляет отклонение от заданного значения 0,03%. Ошибка формы поверхности составила 16 мкм. Интерферограмма волнового фронта после предварительной полировки поверхности зеркала представлена на рис. 7.

Следует особо отметить, что после сферометрических измерений и предварительной полировки контроль осуществлён и ИК интерферометром с корректором и CGH-корректором в видимом диапазоне [11], поэтому ИК корректор, фактически, не понадобился. Таким же образом выполнялась асферизация зеркала

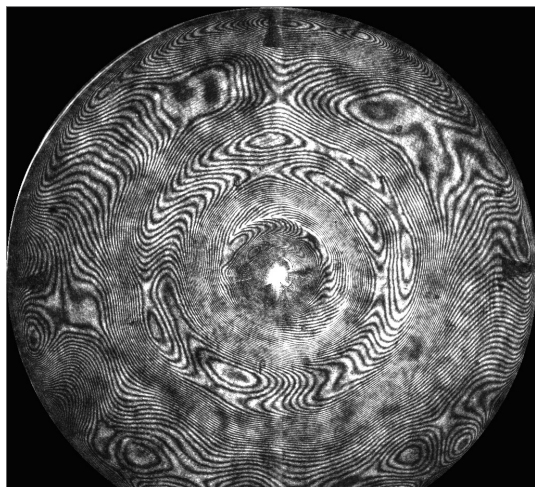


Рис. 7. Интерферограмма волнового фронта после предварительной полировки поверхности зеркала.

проекта TNT (*Thai National telescope, Australia – Thailand*) диаметром 2400 мм с асферичностью 160 мкм, а также ряд других крупных проектов изготовления главных и вторичных зеркал.

Результаты, приведённые на рис. 6 и 7, показывают высокую эффективность и надёж-

* * * * *

ность предложенного метода измерения профиля шлифованной асферической поверхности и практически подтверждают достижение технического результата: построение абсолютного профиля отклонений формы асферической поверхности оптической детали от требуемой теоретической с необходимой точностью (отклонение вершинного радиуса от заданного менее 0,03–0,05%) и достижение заданного значения вершинного радиуса в процессе формообразования.

Заключение

В предложенном методе измерения профиля асферической поверхности при перпендикулярном его расположении диаметральному сечению и последовательном перемещении его от центра к краю удаётся получить подробный профиль абсолютных отклонений асферической поверхности от требуемой с точностью в 5–10 мкм и требуемый вершинный радиус с точностью менее 0,03–0,05% от заданного. Успешная реализация метода была продемонстрирована при асферизации зеркал по проектам VST, TNT, VISTA, DOT ARIES и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V.* Methods of fabrication and testing of unique large size optics in LZOS, JSC (VST, VISTA and other projects) // *Proc. SPIE*. 2012. V. 8450. P. 84504T.
2. *Burge J.H.* Measurement of large convex aspheres // *Proc. SPIE*. 1996. V. 2871. P. 362–373.
3. *Smith B.K., Burge J.H., Martin H.M.* Fabrication of large secondary mirrors for astronomical telescopes // *Proc. SPIE*. 1997. V. 3134. P. 51–61.
4. *Burge J.H., Su P., Zhao C.* Optical metrology for very large convex aspheres // *Proc. SPIE*. 2008. V. 7018. P. 701818-1–701818-12.
5. *Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A.* Manufacturing of primary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST // *Proc. SPIE*. 2001. V. 4451. P. 131–137.
6. *Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V.* M1 and M2 mirror manufacturing for ARIES project: Current status // *Proc. SPIE*. 2010. V. 7739. P. 773907.
7. *Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Sharov Y.A.* Manufacturing of secondary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST // *Proc. SPIE*. 2001. V. 4451. P. 138–144.
8. *Henselmans R., Rosielle P.C.J.N., Steinbuch M., Saunders I.J.* Nanometer accuracy noncontact measurement of freeform optical surfaces // *Philips Precision Technology Conference*, 2005. P. 117– 21.
9. *Bely P.Y.* The design and construction of large optical telescopes. Springer, 2002. 167 p.
10. *Semenov A.P.* Accomplished the task of production of the primary and secondary mirrors of Devasthal Optical Telescope under the project ARIES (India, Belgium, Russia): Fabrication features // *Proc. SPIE*. 2012. V. 8450. P. 84504R.
11. *Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Semenov A.P.* Interference testing methods of large astronomical mirrors base on lenses and CGH wavefront correctors // *Proc. SPIE*. 2010. V. 7739. P. 77390P.